

DESARROLLO DE UN ALGORITMO GLOBAL DE ÁREA QUEMADA PARA IMÁGENES DEL SENSOR ENVISAT-MERIS

ITZIAR ALONSO CAÑAS¹, EMILIO CHUVIECO SALINERO²

Departamento de Geología. Geografía y Medio Ambiente, Universidad de Alcalá.

Calle Colegios 2, 28801. Alcalá de Henares, España.

¹ itziar.alonsoc@uah.es, ² emilio.chuvieco@uah.es

RESUMEN

En este artículo se presentan los avances recientes en el desarrollo de un algoritmo para cartografía global de área quemada a partir de imágenes MERIS. El trabajo se ha desarrollado en el ámbito del programa de cambio climático de la Agencia Espacial Europea (ESA CCI). El análisis de resultados de la primera versión del algoritmo condujo a implementar una serie de modificaciones para mejorar la configuración, que son las que se analizan en este trabajo. Hemos utilizado como áreas test cuatro zonas: Australia, Canadá, California y Península Ibérica, cubriendo un área total de 2.500.000 km². Los resultados obtenidos para los distintos tests se compararon con los perímetros de área quemada generados por los gestores de incendios en cada zona, obteniéndose mejoras respecto a la primera versión del algoritmo. Para el año 2008, se obtuvo una fiabilidad global de 0,982 (frente al 0,975 de la versión anterior). Esta nueva versión del algoritmo se utilizará para procesar la serie completa de datos MERIS (2002-2012) en la segunda fase del programa CCI.

Palabras clave: área quemada, global, MERIS, incendios, quema de biomasa.

DEVELOPMENT OF A GLOBAL BURNED AREA ALGORITHM FROM ENVISAT-MERIS IMAGERY

ABSTRACT

In this paper we present the recent developments of an algorithm to detect burned areas on a global scale from MERIS imagery. This work has been developed in the framework of the European Space Agency's (ESA) Climate Change Initiative (CCI). The analysis of the results obtained in the first phase led to the implementation of a series of tests, which are presented in this work, to improve the algorithm configuration. We used as test sites four areas: Australia, Canada, California and Iberian Peninsula, covering an area of 2.500.000 km². The results obtained for the

Recibido: 10/08/2015

Aceptada versión definitiva: 15/01/2016

[Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International \(CC BY-NC-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

© Los autores
www.geofocus.org

different tests were compared to burned area perimeters generated by fire managers in each area. Improvements compared to the first version of the algorithm were identified. For 2008, an overall accuracy of 0,982 was obtained (compared to the 0,975 from the previous version). This new version of the algorithm will be used to process the complete MERIS archive (2002-2012) in the second phase of ESA's CCI programme.

Keywords: burned area, global, MERIS, fires, biomass burning.

1. Introducción.

1.1. Contexto.

La necesidad de conocer los efectos que los incendios tienen tanto a nivel regional como global, así como a las pérdidas económicas y el riesgo de pérdida de vidas humanas que conlleva, supone que este fenómeno sea objeto de un creciente interés por parte de la comunidad científica (Bowman et al 2009). Por otro lado, se observa que la interacción entre clima e incendios es cada vez mayor (Kloster et al 2012). Los cambios en el clima tienen el potencial de influir en los regímenes de incendios, principalmente a través de los cambios en el régimen térmico y en las precipitaciones, que afectan no solo a la extensión de la estación de incendios, sino que también aumentan su severidad y extensión (Daniau et al 2012, Krawchuck et al 2009). A su vez estos incendios contribuirán a un mayor calentamiento global, debido a la emisión de gases de efecto invernadero (Van der Werf et al 2010), así como a la modificación de uso de suelo que puede darse a raíz de estos eventos. Además, los aerosoles emitidos durante los incendios pueden contribuir de forma negativa en el balance radiativo.

Para poder evaluar estos efectos es necesaria una adecuada caracterización de los incendios así como de la superficie quemada (Mouillot et al 2014). La obtención de registros de área quemada (AQ) a escala global mediante sensores de baja resolución para largos períodos de tiempo es el objetivo principal del proyecto fire_CCI, que se engloba dentro de la Iniciativa de Cambio Climático (Climate Change Initiative - CCI) de la Agencia Espacial Europea (ESA). El objetivo de esta iniciativa es responder a una serie de requisitos expresados por el programa GCOS (Global Climate Observing System), que identifica algunas variables como climáticas esenciales (ECV). De las que lista GCOS, la ESA ha seleccionado para el programa CCI 13 variables, incluyendo atmosféricas, oceánicas y terrestres (Hollman et al 2013). Cada una de estas variables se aborda por un proyecto en el que participan expertos europeos en observación de la Tierra, junto a modeladores del clima.

En este contexto, el proyecto fire_CCI se orienta a cartografiar área quemada a escala global para la mayor serie posible de años. También se incluye el pre-proceso de los datos, la validación de los resultados y la integración de los mismos en modelos de emisiones y dinámica global de la vegetación. En el marco del proyecto fire_CCI, nuestro grupo ha desarrollado el algoritmo para la detección de AQ a partir de imágenes del sensor ENVISAT-MERIS, que es el objeto principal de este artículo.

1.2. Productos de área quemada.3

La obtención de productos de área quemada se realiza desde principios de los años 90, utilizando para ello imágenes del sensor AVHRR a bordo de uno de los satélites NOAA (Kasischke et al 1993). Para realizar la detección se empleaban principalmente cambios multi-temporales de índices espectrales. También en este periodo se desarrollaron algoritmos que utilizaban la información de los canales térmico y óptico (Fraser et al 2000, Roy et al 1999).

Actualmente existen varias iniciativas que ofrecen productos de este tipo, tanto a escala global como regional. Por lo que respecta a la escala global, cabe destacar los productos MCD45 (Roy et al 2005a) y MCD64 (Giglio et al 2009), que utilizan datos provenientes del sensor MODIS. El primero se basa en la detección de diferencias temporales observadas respecto a las predichas mediante un modelo de reflectancia bidireccional. El MCD64 se basa en un algoritmo que combina las detecciones de incendios activos con cambios multi-temporales en índices espectrales. Además de estos dos productos, se han llevado a cabo otros proyectos que buscaban obtener estimaciones de área quemada, como los generados a partir del sensor SPOT-VGT. El primero se denominó GBA2000 (Tansey et al 2004), que estimaba el AQ mediante una serie de algoritmos regionales basados en cambios multi-temporales en la reflectividad o en índices espectrales. Como continuación de este producto se generó el L3JRC (Tansey et al 2008) que extendió la serie temporal para los años 2000 a 2007. Además, dentro de un proyecto ESA, se creó el producto GLOBSCAR (Eva y Lambin 1998, Piccolini y Arino 2000) basándose en los datos del sensor ATSR-2. Posteriormente, el proyecto GlobCarbon (Plummer et al 2007), también de la ESA, combinó los algoritmos desarrollados para VGT y ATSR para crear un producto de AQ que cubriese el periodo 1998 a 2007 basado en datos de VGT y ATSR-2.

El producto fire_CCI continúa esta línea de la ESA, pero en este caso los datos de partida se adquirieron por el sensor MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), a bordo del satélite ENVISAT (Environmental Satellite), con mejor resolución espacial (300 m) que los anteriores productos de la ESA. El presente trabajo se basa en los datos de este sensor.

1.3. Técnicas para detección de área quemada.

De forma general la detección de AQ puede realizarse basándose en dos enfoques: el primero tiene en cuenta el contraste térmico producido por los incendios activos, mientras que el segundo considera los cambios en la reflectividad producidos por el fuego.

En el caso de la detección por incendios activos, se explota el hecho de que los incendios tienen temperaturas mucho más altas que otras superficies. La radiancia térmica y por tanto la amplificación de la señal aumenta exponencialmente con la temperatura. Por esto la detección de la señal proveniente de incendios activos es más fácil de detectar que los cambios introducidos en la reflectancia debidos a un incendio. Generalmente los métodos de detección de incendios activos utilizan radiancias emitidas en el infrarrojo medio (en torno a 3,5 micras, donde la emisión espectral de un incendio será mucho mayor) en contraste con la información en la banda térmica, que proporciona información de la temperatura del fondo. La principal limitación de esta técnica es que

la señal térmica dura únicamente mientras los incendios están activos, por lo que dependerá en gran medida de la hora de paso del sensor y de la frecuencia temporal de este.

En el caso de buscar cambios en la reflectividad producidos por el fuego, se estudia la serie temporal de datos para identificar cambios, y determinar si estos están relacionados con un incendio. En este caso, la amplificación de la señal no es tan evidente como en el caso de la temperatura, pero el cambio introducido perdura durante más tiempo, lo que permite realizar la caracterización del área quemada a posteriori, así como determinar su extensión.

Estas técnicas se pueden combinar dando lugar a los algoritmos híbridos, aunando las ventajas de estas dos técnicas, es decir un mayor cambio detectable en el térmico y una mayor permanencia en el tiempo detectable en la reflectividad. Además esto permite obtener superficies quemadas completas, mientras que con el contraste térmico solo se conoce la situación del fuego en el momento en que se adquiere la imagen. Un ejemplo de esto puede verse en Roy et al (1999) que utilizaron AVHRR y MODIS para obtener mapas de área quemada, Fraser et al (2000) que mediante el algoritmo HANDS (Hotspot and NDVI differencing synergy) estimaron AQ utilizando datos de AVHRR y más recientemente Giglio et al (2009), que combinaron los incendios activos y las reflectancias de MODIS para obtener el producto MCD64 de AQ.

Una metodología bastante habitual a la hora de crear algoritmos de AQ se basa en la utilización de dos fases: semillado y crecimiento (Bastarrika et al 2011, Chuvieco et al 2008). El objetivo de la primera fase es obtener píxeles semilla en los que la probabilidad de quemado es muy alta. Posteriormente, en la segunda fase, se aplica un crecimiento alrededor de estos píxeles semilla, verificando las condiciones de los píxeles vecinos. Otras formas de detección de AQ pueden basarse en detección de objetos y segmentación, redes neuronales o SVM (Support Vector Machine).

1.4. Algoritmos de área quemada para el sensor MERIS.

MERIS es un espectrómetro programable con 15 bandas que cubren el rango de los 390 a los 1040 nm. Se instaló a bordo del satélite ENVISAT de la ESA, lanzado en 2002 y operativo hasta 2012. Se trata de un equipo de exploración por empuje (push-broom), que observa la superficie terrestre con un ángulo de visión de $\pm 34,2$ grados alrededor de nadir, cubriendo una franja de 1150 km, dando lugar a una cobertura completa cada 3 días en regiones ecuatoriales. La resolución espacial es de 300m en el nadir en el modo de resolución completa (FR - full resolution) y de 1200 metros en el modo de resolución reducida (RR - reduced resolution). MERIS presenta una serie de bandas estrechas en el NIR, útiles para la detección de áreas quemadas. Sin embargo, otras bandas útiles para este fin, como pueden ser el SWIR el TIR, no están presentes en este sensor, lo que puede dificultar la capacidad de detección en determinadas regiones.

El sensor MERIS se había empleado para algunos estudios de área quemada, pero únicamente a escala regional utilizando distintos índices de vegetación (Oliva et al 2011), o mediante la combinación del producto HotSpot (HS) de MODIS con imágenes MERIS y MODIS (González-Alonso et al 2009b). Para todo el planeta, el primer producto generado es el que formó parte del proyecto fire_CCI (Alonso-Cañas y Chuvieco 2015). Este algoritmo puede clasificarse dentro de la categoría de algoritmo híbrido, ya que combina la información obtenida del contraste térmico (proporcionada por el producto MODIS HS) y de los cambios temporales en las reflectividades de

los datos MERIS. Para mejorar la estabilidad temporal y espacial de los datos se decidió crear compuestos mensuales de infrarrojo cercano (NIR) y GEMI (Global Environment Monitoring Index) (Pinty y Verstraete 1992). El índice GEMI combina las bandas en el infrarrojo cercano y en el rojo de forma no lineal, minimizando los efectos atmosféricos y del suelo. Su valor disminuirá al producirse un incendio. Los compuestos mensuales se basaron en una matriz de Thiessen (Brassel y Reif 1979) en la que cada píxel se etiquetó con la fecha del HS más cercano. El algoritmo consta de dos fases: semillado y crecimiento. En la primera fase, se identificaron los píxeles semilla, es decir los puntos más claramente clasificables como quemados. Para ello se obtuvieron curvas de quemado y no quemado, mediante estadísticas locales (basadas en regiones de 10x10 grados) obtenidas de forma mensual. Estas curvas permitieron definir un umbral de quemado, en el que los píxeles con NIR inferior a este umbral se consideraron posibles semillas. Además de presentar un NIR por debajo del valor umbral, los píxeles analizados debían mostrar una caída en el NIR respecto al mes anterior y tener al menos un HS a una distancia menor de 5 píxeles para ser clasificados como semillas. Si los píxeles cumplían los 3 criterios se clasificaban como semilla. A partir de ellos se realizó el crecimiento de regiones, analizando los píxeles vecinos a estas semillas de forma recursiva. En esta segunda fase se aplicaron de nuevo 3 condiciones. En primer lugar el NIR del píxel examinado debía ser menor que un umbral (más relajado que el de la primera fase). En segundo lugar debía existir una caída respecto al mes anterior. En tercer lugar, tras obtener la diferencia entre el GEMI mensual y la referencia de GEMI del máximo anual, se examinó si esta diferencia era de al menos 0,9 veces la diferencia encontrada en el píxel semilla. Los píxeles que cumplieron estas tres condiciones se clasificaron como quemados, y se comprobó de nuevo si los píxeles inmediatamente vecinos a estos cumplían los criterios a su vez. La descripción completa de estos pasos puede verse en Alonso-Canas y Chuvieco (2015).

El algoritmo descrito se utilizó para generar un producto global de área quemada para el periodo 2006 a 2008. Se obtuvieron estimaciones de área quemada que varían entre 3,6 y 3,8 millones de km². Los patrones espaciales y de estacionalidad son consistentes entre estos 3 años y con otros productos de área quemada. La comparación con los tres años de datos derivados de GFED (Global Fire Emissions Database, Giglio et al 2013) mostró una gran correlación entre este producto y el obtenido mediante el algoritmo MERIS (Chuvieco et al 2015). Los resultados de validación, obtenidos a partir de más de 100 pares de imágenes Landsat (Padilla et al 2015) indicaron una fiabilidad global mayor de 0,95. Los errores de omisión y comisión (OE,CE) fueron menores para las zonas con mayor proporción de área quemada (OE = 0,51, CE = 0,52) siendo algo mayores en zonas con muy baja proporción de área quemada (OE=0,74, CE = 0,60). Agrupando estos dos resultados se obtuvo una fiabilidad del 0,996, un error de comisión de 0,64 y un error de omisión de 0,76.

Una de las limitaciones principales del sensor MERIS para este tipo de estudios es su resolución temporal, particularmente cuando se trabaja con la versión de alta resolución. A modo de ejemplo en la figura 1 se muestran las observaciones válidas anuales que se obtienen para las 4 zonas de interés: Canadá (a), Australia (b), California (c) y Península Ibérica (d). Se puede observar que en latitudes altas el número de observaciones puede no sobrepasar las 30 imágenes por año. También el número de observaciones válidas será menor en zonas con alta cobertura nubosa.

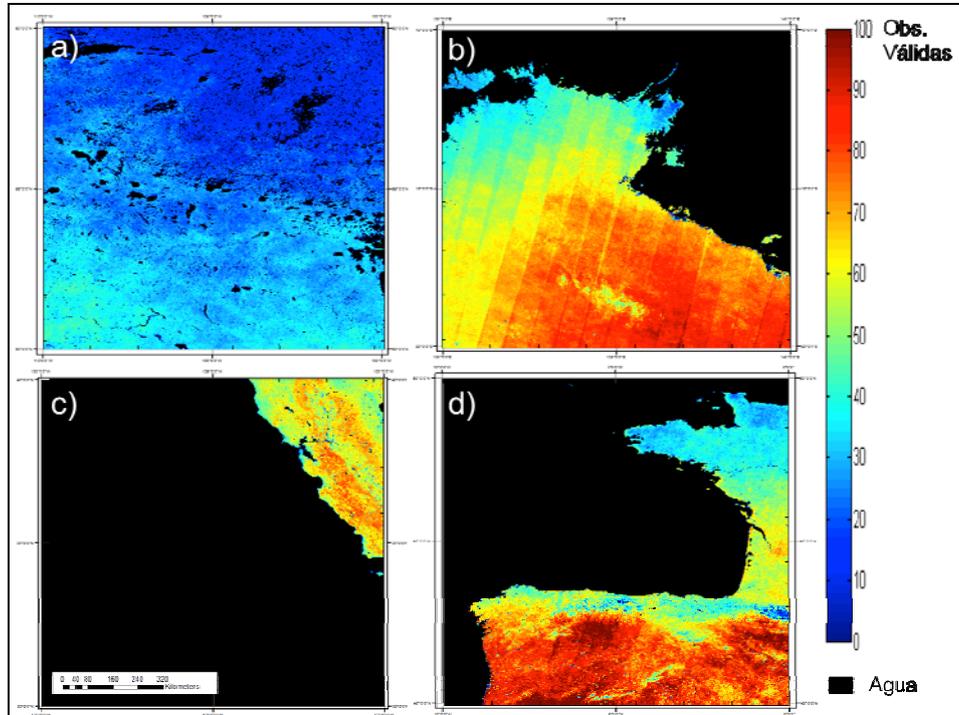


Figura 1. Número de imágenes válidas en el 2008 para 4 zonas de interés: Canadá (a), Australia (b), California (c) y Península Ibérica (d).

Además, las series temporales presentaban una variabilidad. Esto puede dar lugar a errores de comisión u omisión. Un ejemplo de la variabilidad de estas series se puede ver en la figura 2. En ella vemos las bandas 10 y 8 de MERIS para un píxel de Angola en el año 2008. Se resalta también la fecha de posible quemado indicada por el HS en rojo. Se puede ver como en el primer caso el ruido no afecta a la detección mientras que en el segundo estaríamos frente a un posible error de omisión, además de presentar una caída en el NIR en el día 90 mucho mayor que la presentada en la fecha del posible incendio.

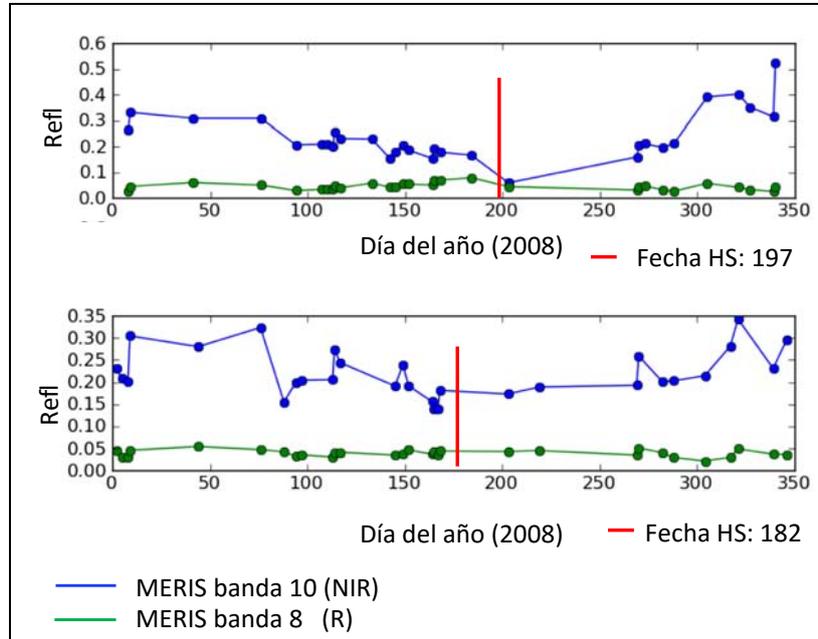


Figura 2. Evolución temporal de la reflectividad para las Bandas 8 y 10 del MERIS en dos píxeles quemados en Angola (datos de 2008).

El algoritmo fue diseñado para minimizar estos efectos, así como posibles confusiones con sombras de nubes, con regiones con suelos oscuros o que pudiesen sufrir inundaciones.

2. Objetivos.

El objetivo de este estudio es presentar una nueva versión del algoritmo MERIS para cartografía global de AQ. Las mejores presentadas intentan corregir algunos problemas encontrados en la primera versión del algoritmo, tanto en la fase de semillado como en la de crecimiento contextual. Las propuestas de mejora en la detección se han ensayado sobre cuatro zonas de estudio con características contrastadas desde el punto de vista de la ocurrencia del fuego (figura 3): biomas tropicales de alta ocurrencia (norte de Australia), biomas boreales (Canadá) y biomas templados (Península Ibérica y California). Todos ellos cuentan con perímetros de referencia obtenidos de los servicios forestales nacionales.

3. Metodología.

3.1. Áreas de referencia

Para analizar el producto de AQ obtenido mediante la primera versión del algoritmo se tuvieron en cuenta los resultados de la validación, basada en pares multi-temporales de imágenes Landsat (Padilla et al 2015). Las distintas pruebas realizadas sobre el algoritmo MERIS se aplicaron a cuatro zonas de estudio en las que se realizó una comparación frente a una serie de perímetros de

referencia disponibles, y que además cubrían distintos tipos de ecosistemas (boreal, templado y tropical) (figura 3). Se consideraron zonas mucho más amplias ($> 2.500.000 \text{ km}^2$ frente a los $< 34.000 \text{ km}^2$ de las escenas Landsat), lo que permitió realizar un mejor análisis de las zonas en las que el área quemada era grande. Además en este caso se compararon los productos de AQ para todo el año, pudiendo así hacer frente a algunos problemas derivados de las zonas Landsat de validación, que únicamente tienen en cuenta períodos cortos de tiempo (lo que puede inducir a errores de omisión y comisión que en realidad están relacionados con el fechado, y no con la detección en si). En las cuatro zonas seleccionadas para este artículo se ha contado con la serie anual de AQ obtenida a partir de bases de datos oficiales:

- Canadá: Los perímetros se obtuvieron de la base de datos de incendios nacionales Canadiense (Canadian National Fire Database (CNFDB)). Es una colección que agrupa datos provenientes de distintas agencias de gestión de incendios (provincias, territorios y Parks Canada). De esta base de datos se seleccionó una región de $1.150.000 \text{ km}^2$ cubriendo los bosques boreales de Alberta y Saskatchewan. Se trata de una región de ecosistema boreal, caracterizada por incendios de tamaño intermedio, que se dan principalmente en el período de junio a septiembre. Los cambios introducidos por el fuego en esta zona pueden verse pasados varios años de la fecha del incendio, por lo que la regeneración en esta zona es lenta.

- Australia: se seleccionó una región situada al norte de Australia para realizar la comparación de perímetros. Estos se descargaron de la base de datos de incendios del Norte de Australia (North Australian Fire Information database (NAFI)). La zona seleccionada tiene una extensión de 750.000 km^2 y está cubierta principalmente por sabana y bosque tropical. Los perímetros de AQ de NAFI fueron procesados por el Centro de investigación de la Universidad Charles Darwin. Estos perímetros se obtuvieron mediante comparación multi-temporal de imágenes MODIS a 250m, utilizando segmentación e interpretación visual. Esta región esta compuesta principalmente por sabana tropical. El tamaño de las AQ es pequeño para una gran parte de los incendios que se dan en esta región, teniendo una gran importancia las quemas controladas. Se producen incendios durante todo el año, y la señal no se mantiene durante mucho tiempo por lo que la regeneración es rápida.

- California: los perímetros para esta región se obtuvieron del Fire and Resource Assessment programme (FRAP). La región de validación es de 150.000 km^2 incluyendo California y los estados vecinos. Esta región presenta características de bosque templado, con incendios de tamaño intermedio a grande. Se trata de incendios severos, que se dan en verano, época en la que predomina la vegetación seca.

- Península Ibérica: los perímetros se obtuvieron del sistema europeo de información de incendios forestales (European Forest Fire Information System (EFFIS)). EFFIS utiliza también imágenes MODIS para obtener los perímetros de AQ. La región utilizada incluye parte de la Península Ibérica, cubriendo un área de 500.000 km^2 . En esta región predomina el bosque mediterráneo. Presenta incendios de tamaño pequeño a intermedio. La época de mayor frecuencia de incendios se da en verano.

Estas zonas pueden considerarse idóneas para una primera evaluación de la calidad de la detección del área quemada, al cubrir un periodo anual completo, de zonas bastante grandes, y en cuatro ecosistemas bastante impactados por el fuego. No obstante, la comparación de nuestros resultados con esta información de referencia no puede considerarse como una validación estricta, ya que se trata de una muestra seleccionada sin criterios estadísticos. Además los perímetros proceden de distintas metodologías. En cualquier caso, puede considerarse como una comparación preliminar, en la línea del análisis de otros autores trabajando con algoritmos globales (Chang y Song 2009, González-Alonso y Merino-de-Miguel 2009a, Pu et al 2007, Giglio et al 2003, Roy y Boschetti 2009). Los datos facilitados por estas cuatro bases de datos fueron proyectados a coordenadas geográficas, para así poder compararlos con los datos de AQ del producto MERIS.

A partir de este análisis de resultados, en el que se tuvieron en cuenta las técnicas utilizadas para las dos fases del algoritmo (formación del compuesto, condiciones en las semillas, condiciones de crecimiento) se diseñaron una serie de tests. El objetivo de estas pruebas era introducir posibles mejoras en la configuración del algoritmo, para así disminuir los errores de omisión y comisión encontrados en la primera fase, dando lugar a la segunda versión del algoritmo.

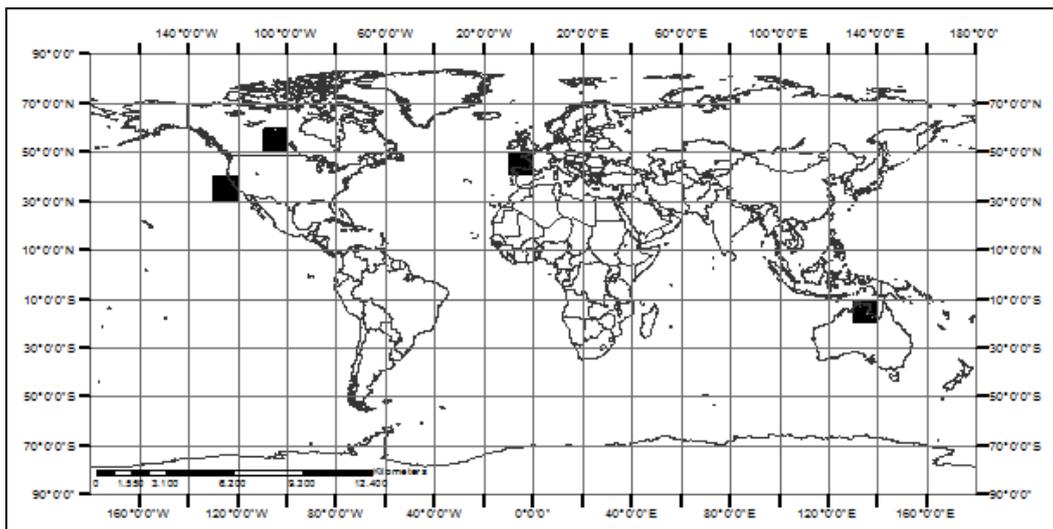


Figura 3. Localización de las 4 zonas seleccionadas para la comparación del producto MERIS con incendios de referencia.

3.2. Problemas detectados en la primera versión del algoritmo MERIS.

En la validación de los resultados de la versión previa de nuestro algoritmo (Padilla et al 2015) se observó que tenía tendencia a la subestimación de las áreas quemadas. También a partir de la comparación con los perímetros de nuestras áreas test (tabla 1 en la sección de resultados) se observó que en tres de las cuatro zonas de interés los errores de omisión superaban a los de comisión en los tres años analizados (2006-2008). Esto se debía principalmente a dos motivos: por un lado, se estaban omitiendo incendios en la fase de semillado y, por otro lado, las condiciones de

crecimiento eran demasiado estrictas, no llegando a identificar la totalidad de la mancha de quemado y dando lugar a incendios fragmentados. Un ejemplo de fragmentación de incendio en California se puede ver en la figura 4.

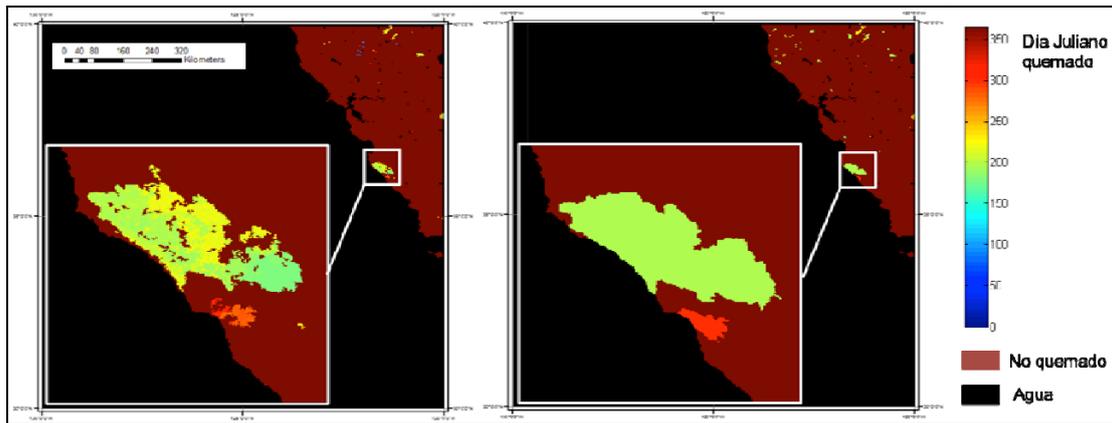


Figura 4. Fragmentación de incendio en la zona de estudio de California. A la izquierda el producto de AQ de MERIS para el año 2008, con una ampliación del incendio principal. A la derecha los perímetros de CALFIRE con una ampliación del mismo incendio.

En otro orden de cosas, el crecimiento se veía dificultado por la presencia de estructuras geométricas en el compuesto multitemporal que utilizábamos para esta segunda fase. Este compuesto se basaba en la proximidad a los puntos de calor de cada periodo mensual, utilizando la matriz de Thiessen. Esto derivaba en algunas estructuras geométricas poco realistas, sobre todo cuando la serie temporal era limitada, como puede observarse en la figura 5.

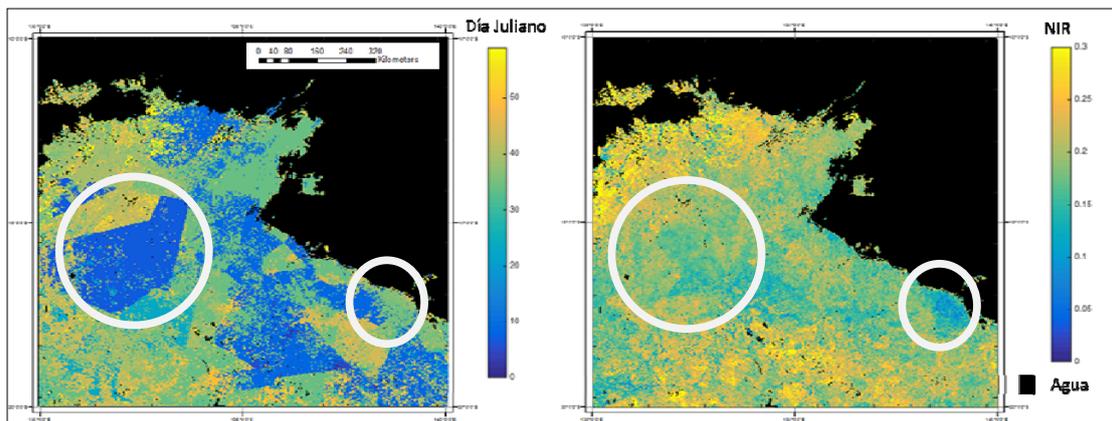


Figura 5. A la izquierda matriz de fechado (día Juliano) para Australia en enero de 2008. Esta matriz se obtiene mediante las imágenes MERIS, y se basa en la matriz de Thiessen obtenida mediante los HS. A la derecha compuesto NIR asociado a la matriz de fechado. En rojo se resalta la presencia de estructuras geométricas en ambos compuestos.

Para mejorar los resultados obtenidos con la primera versión del algoritmo se buscaba aumentar la detección de píxeles quemados, tanto en la fase de semillado como en la de crecimiento. Para ello, se realizaron modificaciones sobre las condiciones generales en la forma de generar las semillas y el crecimiento, estudiando el impacto de estas variaciones sobre la detección.

3.3. Propuestas para mejorar el algoritmo de detección de AQ MERIS.

3.3.1. Fase de semillado.

Se consideró que una buena forma de abordar el problema consistía en aumentar el número de perímetros detectados en esta fase, lógicamente sin que esto modificase de forma sustancial los errores de comisión de cara a la segunda fase del algoritmo. Para evaluar como afectaban las modificaciones introducidas al rendimiento del algoritmo se decidió evaluar cuantos perímetros se detectaban en cada uno de los casos evaluados. Para ello se realizó una clasificación de los incendios en función del tamaño (<100 ha, entre 100 y 1.000 ha, entre 1.000 y 10.000 ha y mayor que 10.000 ha) en las distintas áreas de referencia. Esto permitió también analizar el tipo de incendios que se estaba omitiendo, discriminando los problemas asociados a las características del sensor y los relacionados con el algoritmo. Se obtuvieron los resultados para la versión 1, separando entre incendios detectados y no detectados, y comparándose con una serie de pruebas para mejorar la detectabilidad de los incendios. Las pruebas realizadas son las siguientes:

- Test 1: en esta prueba se mantuvieron las condiciones de la primera fase, pero extendiendo la distancia a la que podría encontrarse un HS; es decir pasando de una matriz de 9x9 píxeles a una matriz de 16x16. Esta opción permitiría aumentar el número de píxeles semilla que se encuentran cercanos a un HS. El uso de una matriz de 16x16 cubriría una zona alrededor del HS relativamente cercana al incendio, considerando así que los píxeles a esta distancia que cumplieren el resto de condiciones serían también semillas de ese mismo incendio. Esto permitiría incluir en la fase de semillado píxeles algo más alejados de los HS que podrían no haberse detectado como tales al no tratarse de incendios activos en ese momento, o al tratarse de incendios menos intensos. Esta condición no permitiría detectar un mayor número de incendios, pero sí tener un mejor muestreo de los incendios ya detectados, lo que ayudaría a mejorar la detección final una vez aplicado el crecimiento, disminuyendo la fragmentación.

- Test 2: en esta prueba se mantuvieron las condiciones de la primera fase pero se eliminó la restricción de tener para cada píxel una caída en el valor del NIR respecto al mes anterior. Esta opción se probó para analizar como afectaba el ruido de las series temporales de MERIS a la fase de semillado. Es decir, podría darse el caso de que la serie temporal de MERIS afectada por la inestabilidad temporal (figura 2), no permitiese ver la caída en un píxel que realmente se hubiera quemado. Es una prueba intermedia al filtrado posterior que se aplica mediante las medianas (tests 4 y 5). Al ser menos restrictivos con esta condición, el número de perímetros detectados podría aumentar, así como el número de píxeles semilla dentro de cada incendio.

- Test 3: este test es una modificación del test 2. Dado que no se estaba exigiendo que existiera una caída en el NIR para clasificar un píxel como semilla, se estaba siendo menos

restrictivo con las condiciones de semillado y eso podría dar lugar a errores de comisión no deseables. Para contrarrestar esto, se buscó que en la matriz de 9x9 alrededor del píxel analizado existieran dos HS en lugar de uno solo como se hacía en la primera versión del algoritmo. Esto permitiría evitar en parte los errores de comisión debidos a los HS, ya que tendría que existir más de una detección de incendio activo en las inmediaciones del píxel para que éste fuese clasificado como semilla. Por lo tanto, con esta condición se buscó ampliar el número de incendios detectados, así como el número de semillas por incendio, ya que no se aplicó la restricción de que existiera una caída en el NIR, pero siendo algo más restrictivos que en el caso anterior (test 2), limitando así en mayor medida los posibles errores de comisión. Como contrapunto, esta restricción podría limitar el número de incendios detectados en las regiones en que la densidad de HS fuera menor.

- Test 4: para esta prueba se eliminó también la condición de que existiese una caída del valor del NIR entre el mes analizado y el mes anterior. En su lugar se probó a buscar esta tendencia de caída en el NIR en la serie de datos, es decir en una ventana temporal más amplia. Para ello se comprobó si la mediana de los valores del NIR de los 3 meses anteriores a la posible fecha de quemado era mayor que la mediana de los valores del NIR posteriores a la fecha de quemado, en cuyo caso el píxel podría ser clasificado como semilla si cumplía el resto de condiciones de la versión 1. Con esta modificación se buscaba hacer frente a los posibles errores de comisión de los HS, analizando el comportamiento temporal de los datos MERIS en una ventana mayor a la utilizada previamente, pudiendo así disminuir un filtrado erróneo de los HS debido al ruido inherente a los datos MERIS. Esto permitiría ampliar el número de incendios detectados, así como el número de semillas por incendio.

- Test 5: en este caso al igual que en el anterior (test 4) se buscaba hallar una tendencia temporal en los valores del NIR. La diferencia reside en el uso de imágenes individuales en lugar de los compuestos mensuales para identificar esta tendencia. El objetivo de este test era estudiar el comportamiento en las fechas pre y post a la fecha indicada por el HS, para poder realizar un filtrado de los HS en función de estos valores, evitando así algunos de los errores de comisión. Para implementar el test se calculó la mediana de los 5 valores anteriores a los de la fecha indicada por el HS (mediana pre). Estos 5 valores se obtuvieron de las 5 imágenes individuales anteriores a la fecha indicada por el HS. De la misma manera se calculó la mediana para los 5 valores de las imágenes posteriores a la fecha indicada por el HS (mediana post). Se comprobó que el valor de la mediana pre fuese mayor que el de la mediana post para cada uno de los píxeles analizados. Los píxeles que cumplieren esta condición serían clasificados como semillas. El uso de las imágenes individuales permitía evaluar períodos de tiempo más cortos que los considerados mediante los compuestos. Por lo tanto esta medida era, respecto a la anterior, más sensible a la detección de incendios en los que la señal de quemado post incendio no permaneciese mucho en el tiempo (zonas tropicales). Comparada con la versión 1 del algoritmo, permitía obtener un filtrado más robusto, pudiendo aumentar el número de incendios detectados y el número de semillas por incendio.

3.3.2. Fase de crecimiento.

También se probaron distintas opciones para el crecimiento. Los errores de la fase de crecimiento de la primera versión del algoritmo estaban relacionados con la forma en la que se generaba el compuesto mensual (creando algunas estructuras geométricas artificiales, derivadas de la matriz de Thiessen, figura 5) y también con las condiciones demasiado restrictivas de crecimiento, que limitaban la correcta delimitación en algunos incendios. Las pruebas realizadas se diseñaron para poder modificar estas dos características y así reducir la omisión en perímetros bien detectados, que es el principal objetivo de la fase de crecimiento. Las semillas utilizadas fueron las obtenidas mediante el test 5, ya que éste fue el que dio mejores resultados entre los tests evaluados. Se detallan a continuación las pruebas realizadas para las 4 zonas de interés:

- Test 6: el objetivo de esta prueba era analizar el funcionamiento de las condiciones de crecimiento identificadas para el compuesto mensual, pero adaptándolas a las imágenes individuales del sensor MERIS. En estas imágenes el incendio podía ser más fácilmente identificable al existir un mayor contraste entre el quemado y el no quemado respecto al compuesto. Además, se asumía que las imágenes individuales estarían libres de las estructuras geométricas derivadas de la matriz de Thiessen utilizada para crear el compuesto. Para llevar a cabo este test, se buscó para la fecha de cada semilla (obtenida en la primera fase) la imagen correspondiente a esa misma fecha. En el caso de que no hubiese una imagen disponible ese día, se utilizó la inmediatamente posterior. Sobre esta imagen individual se realizó el crecimiento. Las condiciones de NIR y GEMI se utilizan de igual manera que en la versión 1, pero aplicadas a las imágenes individuales del sensor MERIS en lugar de al compuesto obtenido en la primera fase del algoritmo. En el caso de la caída del NIR, se contrasta el valor de la imagen individual analizada con el del compuesto del mes anterior.

- Test 7: en el caso de las imágenes individuales, éstas pueden no cubrir de forma completa el incendio. Además, al no realizarse ningún tipo de agrupación, podrían existir muy pocos datos válidos en la imagen en el caso de que hubiese nubes en el momento de paso del sensor. Para hacer frente a esto, se obtuvo un nuevo compuesto, que cubría un período temporal menor que el utilizado en la versión 1, con lo que la permanencia de la señal de quemado sería más fácilmente identificable, y libre de estructuras geométricas. Este compuesto se obtuvo con el mínimo de NIR cada diez días y agrupando las semillas de 10 en 10 días. Se aplicó el crecimiento sobre este nuevo compuesto.

- Test 8: se observó en determinadas regiones que los compuestos de diez días podrían seguir teniendo pocos datos (debido a una mayor persistencia de nubes o peor cobertura del sensor), por lo que en esta prueba se agruparon imágenes en períodos de 20 días para generar el compuesto, buscando las mismas ventajas que en el test 7.

- Test 9: el objetivo de esta prueba era analizar el funcionamiento de otras condiciones de crecimiento distintas a las utilizadas en la versión 1. Se buscó un método en el que el crecimiento estuviese adaptado a cada incendio, en lugar de utilizar las estadísticas generales para la zona de 10x10 grados, como se hacía en la versión 1, de tal forma que se adaptara mejor a cada incendio. Para esta prueba se aplicó la condición de que el píxel se considerase quemado si su NIR era menor que la mediana + la desviación estándar de los píxeles vecinos quemados. Las estadísticas se calcularon para los píxeles quemados en la matriz de 5x5 alrededor del píxel analizado y únicamente en el caso de que hubiese al menos 3 píxeles ya clasificados como quemados dentro de esa matriz.

- Test 10: se aplicaron las condiciones del test 9 de crecimiento a las imágenes diarias, buscando por lo tanto el mayor contraste existente en las imágenes individuales, así como evitar las estructuras geométricas del compuesto.

4. Resultados.

4.1. Comparación con los perímetros para las 4 zonas analizadas.

En la tabla 1 se muestra la comparación entre los perímetros de nuestras cuatro zonas de referencia y los resultados de la versión 1 del algoritmo (Alonso-Canas y Chuvieco 2015), del que partimos para elaborar este artículo. Se puede ver como los valores de omisión y comisión son más bajos que los obtenidos por Padilla et al (2015) mediante un muestreo estadístico global basado en datos Landsat. En nuestra opinión, esta divergencia puede explicarse porque nuestros datos están menos afectados por la fiabilidad en la detección temporal, que afecta más cuando los periodos de referencia que se comparan son más cortos (pocas semanas en el caso de las imágenes Landsat, frente a todo el año en este caso), y una superficie más grande (frente a la zona abarcada por los pares de imágenes Landsat).

Se observa que la zona de Australia es la que más se quema para los 3 años, con una proporción de área quemada (BAp) que varía entre 0,18 y 0,45. La Península Ibérica tiene la menor ocurrencia de incendios (<0,001), mientras que las zonas de California y Canadá varían entre 0,007 - 0,013 y 0,013 - 0,027, respectivamente.

Tabla 1. Tabulación cruzada del producto de área quemada de MERIS con perímetros de incendios para 4 regiones en los años 2006 a 2008. CE = error de comisión, OE = error de omisión, OA = fiabilidad global, BAp = proporción de área quemada en la zona de referencia.

	2006				2007				2008			
	CE	OE	OA	BAp	CE	OE	OA	BAp	CE	OE	OA	BAp
Australia	0,085	0,425	0,789	0,447	0,111	0,429	0,808	0,250	0,176	0,444	0,850	0,181
California	0,326	0,341	0,997	0,007	0,354	0,333	0,996	0,010	0,144	0,438	0,996	0,013
Canadá	0,306	0,467	0,981	0,027	0,032	0,560	0,993	0,013	0,102	0,753	0,981	0,026
Península Ibérica	0,440	0,236	0,998	0,002	0,655	0,395	0,999	0,001	0,851	0,643	0,999	<0,001
TOTAL	0,117	0,424	0,966	0,029	0,125	0,431	0,971	0,025	0,147	0,472	0,975	0,019

4.2. Resultados de la fase de semillado.

Se detallan los resultados de las pruebas realizadas en la tabla 2. Se muestra el porcentaje de perímetros detectados con cada test en función del tamaño del incendio.

Tabla 2. Número total de perímetros y porcentaje de perímetros detectados para las 4 zonas de interés en la versión 1 y con las distintas modificaciones (tests 1 a 5) realizadas en la fase de semillado, para el año 2008.

	Zona de estudio	Tamaño del incendio (has)			
	AUSTRALIA	<100	<1.000	<10.000	>10.000
Perímetros detectados	Nº total de perímetros	12174	4652	1373	209
	v1	21%	52%	90%	99%
	Test 1	46%	80%	96%	100%
	Test 2	74%	99%	100%	100%
	Test 3	25%	59%	93%	100%
	Test 4	22%	57%	92%	100%
	Test 5	37%	73%	94%	100%
	CANADÁ	<100	<1000	<10000	>10000
	Nº total de perímetros	30	20	28	34
	v1	0%	25%	54%	88%
	Test 1	0%	35%	57%	88%
	Test 2	17%	95%	100%	100%
	Test 3	3%	50%	82%	100%
	Test 4	3%	50%	68%	94%
	Test 5	3%	45%	75%	94%
	PENINSULA IBÉRICA	<100	<1000	<10000	>10000
	Nº total de perímetros	24	19	4	0
	v1	33%	68%	50%	0%
	Test 1	50%	79%	50%	0%
	Test 2	100%	100%	100%	0%
	Test 3	42%	68%	50%	0%
	Test 4	33%	68%	50%	0%
	Test 5	54%	79%	50%	0%
	CALIFORNIA	<100	<1000	<10000	>10000
	Nº total de perímetros	98	48	25	5
	v1	4%	8%	60%	80%
	Test 1	5%	29%	88%	100%
	Test 2	7%	46%	92%	100%
	Test 3	5%	27%	88%	100%
	Test 4	4%	8%	60%	80%
	Test 5	6%	29%	80%	100%

Analizando los resultados de la tabla 2 se puede ver como cualquiera de las pruebas realizadas en este trabajo aumenta el número de incendios detectados respecto a la versión 1 del

algoritmo. Aun así, es importante remarcar que conviene no elegir la opción que más incendios detecta, si no aquella que combina un aumento en la detección limitando a la vez los posibles errores de comisión. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos aplicando el crecimiento de regiones a las distintas opciones, las características de los datos MERIS y el número de perímetros detectados, se decidió elegir como nueva condición de semillado la mediana diaria con 5 imágenes pre y post (test 5). Esta configuración resultó más robusta al ruido de los datos que la que se había elegido en la versión 1 del algoritmo, permitiendo detectar un mayor número de incendios sin aumentar la comisión de forma excesiva.

4.3. Resultados de la fase de crecimiento.

Los resultados de estas pruebas se detallan en la tabla 3. Se analizan los errores de omisión y comisión para cada uno de estos casos para las 4 zonas de interés en el año 2008.

Tabla 3. Errores de comisión y omisión del área quemada obtenidos para las 4 zonas de estudio en el año 2008 con las distintas versiones de crecimiento.

		Australia	Canadá	Península Ibérica	California	TOTAL
Versión 1	Comisión	0,176	0,102	0,851	0,144	0,147
	Omisión	0,444	0,753	0,643	0,438	0,472
	OA	0,850	0,981	0,999	0,996	0,975
Test 6	Comisión	0,224	0,183	0,971	0,280	0,233
	Omisión	0,388	0,511	0,537	0,319	0,405
	OA	0,942	0,989	0,998	0,999	0,982
Test 7	Comisión	0,182	0,156	0,987	0,387	0,269
	Omisión	0,519	0,456	0,505	0,307	0,562
	OA	0,936	0,990	0,996	0,998	0,980
Test 8	Comisión	0,272	0,154	0,988	0,417	0,291
	Omisión	0,357	0,445	0,502	0,302	0,369
	OA	0,939	0,990	0,996	0,998	0,981
Test 9	Comisión	0,472	0,272	0,994	0,619	0,483
	Omisión	0,110	0,352	0,491	0,170	0,147
	OA	0,907	0,989	0,991	0,997	0,971
Test 10	Comisión	0,376	0,196	0,991	0,440	0,387
	Omisión	0,261	0,382	0,516	0,270	0,279
	OA	0,928	0,990	0,994	0,998	0,978

Se puede ver como en todos los casos los errores de omisión disminuyen y los de comisión aumentan respecto a la versión 1. El crecimiento sobre imágenes individuales (test 6) permite reducir en gran medida los errores de omisión para las regiones de Australia, Canadá y California. Las técnicas de compuesto a 10 y 20 días (test 7 y 8 respectivamente) obtienen resultados similares para las regiones de Australia y Canadá, pero aumenta mucho la comisión para la región de California. El nuevo crecimiento (test 9 y 10), utilizando la técnica de la media y desviación estándar, disminuye los errores de omisión de forma sustancial pero aumenta en la misma proporción los errores de comisión.

A través del análisis de estos resultados se concluyó que el crecimiento sobre imágenes individuales (test 6) aplicando el mismo tipo de crecimiento desarrollado en la primera fase sería elegido para la versión 2 del algoritmo. Un ejemplo del impacto de estos cambios en las detecciones se puede ver en la figura 6. En ella se presentan, para la zona de estudio de Canadá en 2008, los resultados de las versiones 1 y 2, y los perímetros derivados del CNFDB. Se puede observar como el número de incendios detectados es mayor y también como la detección de cada AQ mejora ya que éstas se detectan de forma más compacta, teniendo menos fragmentación en cada incendio.

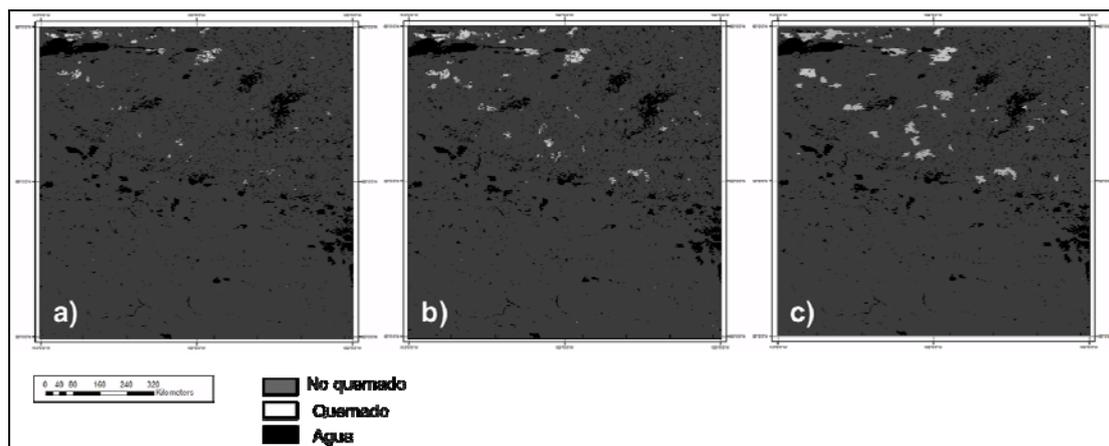


Figura 6. AQ con la versión 1 (a), versión 2 (b) del algoritmo MERIS y con los perímetros (c) para Canadá 2008.

5. Discusión.

Mediante las pruebas realizadas se ha buscado mejorar los errores de omisión del algoritmo AQ MERIS, evitando aumentar los errores de comisión. Es importante destacar que algunas de las posibles limitaciones a la hora de mejorar estos resultados están relacionadas con las características del propio sensor. La baja frecuencia temporal de MERIS (si la comparamos con otros sensores globales, como MODIS o VEGETATION) no permite una implementación de técnicas de series temporales. En determinadas zonas, en las que la pérdida de la señal de quemado puede no durar más de 15 días, la cobertura teórica del sensor permitiría obtener un máximo de 5 imágenes en este periodo. Si además se tiene en cuenta la cobertura nubosa, el número de imágenes proporcionado

por el sensor en estos casos puede ser insuficiente para identificar una caída en el NIR en la serie temporal obtenida mediante este número limitado de imágenes. Por otro lado, las bandas presentes en este sensor, aun siendo adecuadas, presentan una serie de limitaciones, principalmente derivadas de la falta de información sobre el infrarrojo de onda corta (SWIR). Se ha comprobado en varios trabajos que esta banda resulta muy útil para eliminar algunas posibles confusiones entre área quemada y otras cubiertas (Pereira et al 1999, Roy y Landmann 2005b, Giglio et al 2009).

Los resultados aquí presentados buscan mejorar los ya obtenidos en la primera fase, teniendo en cuenta estas limitaciones inherentes al sensor MERIS. La nueva técnica de semillado identificada (test 5) permite aumentar la detección de perímetros en las regiones de interés en un 16% para las áreas de Australia y Península Ibérica, un 11% en California y un 12% en Canadá. Esta nueva implementación es más robusta que la utilizada previamente, ya que al obtener una mediana de los 5 valores pre y post incendio se mitiga la inestabilidad temporal de los datos MERIS frente a la evolución de los valores diarios del NIR. Cabe destacar también que el semillado está influenciado por los errores de omisión y comisión del producto HS. En efecto, podemos comprobar que la región de la Península Ibérica presenta unos errores de comisión mayores que las otras 3 zonas estudiadas. Estos resultados concuerdan con el análisis realizado por Hantson et al (2013), en el que se identifica la región de Portugal como una de las que presenta errores de comisión de los HS más elevados (no hay que olvidar que nuestro algoritmo se apoya sustancialmente en la detección de puntos de calor que hace el producto MODIS). Si bien a escala global los errores de comisión de los HS son muy bajos, los de omisión pueden ser elevados para incendios de pequeño tamaño (<100 ha) (Hantson et al 2013). Esto afectará principalmente a aquellas áreas del planeta donde éstos son más relevantes, como es el caso del bosque templado y zonas de sabana y transición bosque-matorral (África del Sur o Brasil).

En cuanto a las opciones de crecimiento probadas, se decidió elegir en la versión final del algoritmo el crecimiento de la versión 1 aplicado sobre las imágenes diarias (test 6). Se consideró que esta opción suponía un mejor compromiso entre los errores de omisión y comisión entre las opciones probadas. Es más exacta en la detección de incendios que la utilizada en la primera fase, ya que las imágenes individuales presentan unas características más claras para la identificación de los incendios. Además, no presenta estructuras geométricas derivadas de la matriz de Thiessen y de la agrupación de las distintas imágenes en la formación del compuesto (figura 5), que dificultaban la detección sobre el compuesto mensual obtenido en la primera versión del algoritmo. Como contrapunto, es necesario señalar que el método es sensible a la calidad de las imágenes diarias. Si no cubren toda la zona quemada, ya sea por la geometría de adquisición o por la cobertura nubosa, la detección de incendios sobre imágenes individuales empeorará la realizada a partir de compuestos, ya que no se buscará la continuación de ese incendio en las imágenes sucesivas (salvo que existiesen nuevos HS en los días posteriores). Las pruebas realizadas agrupando los HS de 10 en 10 días y obteniendo compuestos de mínimo NIR de 10 o 20 días (tests 7 y 8) se consideraron como una posible alternativa de mejora a estas limitaciones, pero los errores de omisión obtenidos en el primer caso, y de comisión obtenidos en el segundo, indicaron que no era la opción más adecuada. Estos cambios se deben en parte a que el compuesto creado no es suficientemente estable debido a la inestabilidad temporal de las imágenes MERIS y a que la agrupación de semillas puede dar lugar a crecimientos en regiones en las que el incendio ya no puede ser detectado, obteniendo como resultado importantes errores de comisión. Se probó también una nueva técnica de

crecimiento, modificando el presentado por Libonati et al (2014). Esta implementación (tests 9 y 10), que calculaba la mediana y desviación estándar de cada incendio, se consideró potencialmente interesante ya que permitía por medio de estos estadísticos adecuarse de forma más concreta a las condiciones particulares de cada evento, en lugar de utilizar las estadísticas obtenidas para las regiones de 10x10 grados. Sin embargo, mientras los errores de omisión disminuyen de la forma esperada, los resultados obtenidos mostraron unos errores de comisión elevados respecto a las otras pruebas realizadas.

Además de los resultados presentados en la sección anterior, fueron probadas otras opciones de crecimiento, como los filtros de bordes y segmentación, tanto sobre compuestos NIR como utilizando también las bandas 5 y 8 de MERIS. Los resultados de estas pruebas no permitieron mejorar los ya obtenidos con la versión 1 del algoritmo por lo que estas posibles implementaciones fueron descartadas. El motivo por el que se considera que estas opciones de crecimiento no fueron satisfactorias está relacionado con el número de imágenes disponibles y con las variaciones que éstas sufren en el tiempo, así como por la imposibilidad de hallar condiciones que funcionasen adecuadamente para estas implementaciones a nivel global, dada la variedad de la dinámica del fuego en los distintos ecosistemas. Para obtener sucesivas mejoras en la detección de incendios se necesitarían series de datos más completas y también tratar el ruido inherente a estas series mediante mecanismos de filtrado o suavizado.

El algoritmo MERIS ha sido desarrollado buscando sacar provecho de la mayor resolución proporcionada por este sensor, respecto a otros productos de área quemada actualmente existentes (300 m frente a los 500 m de MODIS o 1000 m de VEGETATION). Se ha visto como mediante este producto de área quemada es posible realizar la detección de incendios más pequeños (Chuvieco et al 2015), siendo esto de gran relevancia (Randerson et al 2012). Además, el instrumento OLCI a bordo del satélite Sentinel 3, presenta características similares a las de MERIS, pero con una resolución temporal mayor, por lo que los desarrollos que estamos realizando para MERIS podrían ser de gran interés para ese nuevo sensor, que servirá a bordo de una misión operativa y que, por tanto, tiene garantizada una mayor continuidad.

6. Conclusiones.

En este artículo se han mostrado los avances para una nueva versión de un algoritmo global para la detección de áreas quemadas con datos MERIS. Se han presentado los resultados de una validación preliminar, así como la comparación con otros productos y con perímetros en 4 zonas de estudio. El análisis de estos resultados permitió identificar los puntos en los que se podía mejorar este algoritmo. Mediante un nuevo estudio de estos errores y de las condiciones tanto en las fases de semillado como de crecimiento, se realizaron una serie de modificaciones que permitieron obtener nuevos mapas de área quemada y caracterizar los errores con cada una de las opciones probadas. Se identificaron las nuevas condiciones que permitían mejorar los resultados obtenidos hasta la fecha, disminuyendo los errores de omisión en un 5,6%, 24%, 11% y 12% para las zonas analizadas de Australia, Canadá, Península Ibérica y California, respectivamente. Estos avances formarán parte de la segunda versión del algoritmo MERIS. Esta nueva versión se utilizará para procesar la serie completa de 10 años de MERIS (2002-2012) al inicio de la segunda fase del proyecto fire_CCI.

Referencias bibliográficas.

Alonso-Cañaa, I. y Chuvieco, E. (2015): "Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data", *Remote Sensing of Environment*, 163, 140-152.

Bastarrika, A., Chuvieco, E., y Martín, M.P. (2011): "Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: balancing omission and commission errors", *Remote Sensing of Environment*, 115, 1003-1012.

Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Moritz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C., Scott, A., Swetnam, T., Van der Werf, G., y Pyne, S.J. (2009): "Fire in the Earth system", *Science*, 324, 481-484.

Brassel, K.E., y Reif, D. (1979): "A procedure to generate Thiessen polygons", *Geographical Analysis*, 11, 289-303.

Canadian National Fire Database (CNFDB) (2008): cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/ha/nfdb/ (consultado 02-07-2015).

Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Del Valle, H., Anaya, J., Di Bella, C., Cruz, I., Manzo, L., López, G., Mari, N., González-Alonso, F., Morelli, F., Setzer, A., Csiszar, I., Kanpandegi, J.A., Bastarrika, A., y Libonati, R. (2008): "Global Burned Land Estimation in Latin America using MODIS Composite Data", *Ecological Applications*, 18, 64-79.

Chuvieco, E., Yue, C., Heil, A., Mouillot, F., Alonso-Canas, I., Padilla, M., Pereira, J.M.C., Oom, D., y Tansey, K. (2015): A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. *Global Ecology and Biogeography*, en prensa.

Chang, D., y Song, Y. (2009): "Comparison of L3JRC and MODIS global burned area products from 2000 to 2007", *Journal of Geophysical Research*, 114, 10.1029/2008JD11361.

Daniau A.L. et al (2012): "Predictability of biomass burning in response to climate changes", *Global Biogeochemical Cycles*, 26.

Eva, H., y Lambin, E.F. (1998): "Burnt area mapping in Central Africa using ATSR data", *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3473-3497.

European Forest Fire Information System (EFFIS) (2008): <http://forest.jrc.ec.europa.eu/effis/> (consultado 02-07-2015).

Fire and Resource Assessment programme (FRAP) (2008): frap.fire.ca.gov (consultado 02-07-2015).

Fraser, R.H., Li, Z., y Cihlar, J. (2000): "Hotspot and NDVI Differencing Synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest", *Remote Sensing of Environment*, 74, 362-376.

Giglio, L., Loboda, T., Roy, D.P., Quayle, B., y Justice, C.O. (2009): "An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor", *Remote Sensing of Environment*, 113, 408-420.

Giglio, L., J. Descloitres, C. O. Justice y Y. J. Kaufman (2003): "An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS", *Remote Sensing of Environment*, 87, 273-282.

Giglio, L., Randerson, J.T., & van der Werf, G. (2013): "Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4)", *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118, 317-328

González-Alonso, F., y Merino-de-Miguel, S. (2009a): "Integration of AWiFS and MODIS active fire data for burn mapping at regional level using the Burned Area Synergic Algorithm (BASA)", *International Journal of Wildland Fire*, 18, 404-414.

González-Alonso, F., Salgado, V., Calle, V., Casanova, J.L., Sanz, J., de la Fuente, D., Goldammer, J.G., Li, Z., Qin, X., Zhang, X., Deng, G., Liu, Q., Li, G., Cai, H., y Huang, Z. (2009b): "Forest burn in China by means of MERIS and MODIS images", *Dragon 2 Symposium*, June 2009, Barcelona.

Hanson, S., Padilla, M., Corti, D., y Chuvieco, E. (2013): "Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence", *Remote Sensing of Environment*, 131, 152-159.

Hollmann, R., Merchant, C.J., Saunders, R.W., Downy, C., Buchwitz, M., Cazenave, A., Chuvieco, E., Defourny, P., Leeuw, G.d., Forsberg, R., Holzer-Popp, T., y Paul, F. (2013): "The ESA Climate Change Initiative: satellite data records for essential climate variables", *Bulletin of the American Meteorological Society*, doi 10.1175/BAMS-D-11-00254.1

Kasischke, E.S., French, N.H.F., Harrell, P., Christensen, N.L., Ustin, S.L., y Barry, D. (1993): "Monitoring of wildfires in Boreal Forests using large area AVHRR NDVI composite image data", *Remote Sensing of Environment*, 45, 61-71.

Kloster, S., Mahowald, N., Randerson, J., y Lawrence, P. (2012): "The impacts of climate, land use, and demography on fires during the 21st century simulated by CLM-CN", *Biogeosciences*, 9, 509-525.

Krawchuk, M.A., Moritz, M.A., Parisien, M.-A., Van Dorn, J., y Hayhoe, K. (2009): "Global Pyrogeography: the Current and Future Distribution of Wildfire", *PLoS ONE*, 4, e5102.

Libonati R, DaCamara C., Setzera A., Morellia F., de Jesusa S., Candido P., Melchiori A. (2014): "Chapter 6 – Forest Management: Validation of the burned area "(V,W)" Modis algorithm in Brazil", *Advances in forest fire research*.

Mouillot, F., Schultz, M.G., Yue, C., Cadule, P., Tansey, K., Ciais, P., y Chuvieco, E. (2014): "Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing - A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 64-79.

North Australian Fire Information (2008): www.firenorth.org.au/nafi2/ (consultado 02-07-2015).

Oliva, P., Martin, P., y Chuvieco, E. (2011): "Burned area mapping with MERIS post-fire image", *International Journal of Remote Sensing*, 32, 4175-4201.

Padilla, M., V. Stehman, S.V., Hantson, S., Oliva, P., Alonso-Canas, I., Bradley, A., Tansey, K., Mota, B., Pereira, J.M., y Chuvieco, E. (2015): "Comparing the Accuracies of Remote Sensing Global Burned Area Products using Stratified Random Sampling and Estimation", *Remote Sensing of Environment*, 160, 114-121.

Pereira, J.M.C., Sa, A.C.L., Sousa, A.M.O., Silva, J.M.N., Santos, T.N., y Carreiras, J.M.B. (1999b): "Spectral characterisation and discrimination of burnt areas". Chuvieco, E. (Ed.), *Berlin: Springer-Verlag, Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*, 123-138.

Piccolini, I., y Arino, O. (2000): "Towards a Global Burned Surface World Atlas", *Earth Observation Quarterly*, 65, 14-18.

Pinty, B., y Verstraete, M.M. (1992): "GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites", *Vegetatio*, 101, 15-20.

Plummer, S., Arino, O., Ranera, F., Tansey, K., Chen, J., Dedieu, G., Eva, H., Piccolini, I., Leigh, R., y Borstlap, G. (2007): "An update on the GlobCarbon initiative: multi-sensor estimation of global biophysical products for global terrestrial carbon studies", *Envisat Symposium*. Montreux, Switzerland: ESA SP-636.

Pu, R.L., Li, Z.Q., Gong, P., Csiszar, I., Fraser, R., Hao, W.-M., Kondragunta, S., y Weng, F. (2007): "Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire North America from NOAA/AVHRR data", *Remote Sensing of Environment*, 108, 198-208.

Randerson, J.T., Chen, Y., Werf, G., Rogers, B., y Morton, D. (2012): "Global burned area and biomass burning emissions from small fires", *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 117, G04012, doi: 10.1029/2012JG002128.

Roy, D.P., Giglio, L., Kendall, J.D., y Justice, C.O. (1999): "Multi-temporal active-fire based burn scar detection algorithm", *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1031-1038.

Roy, D., Jin, Y., Lewis, P., y Justice, C. (2005a): "Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data", *Remote Sensing of Environment*, 97, 137-162.

Roy, D. P., y Landmann, T. (2005b): "Characterizing the surface heterogeneity of fire effects using multi-temporal reflective wavelength data", *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4197-4218.

Roy, D. y L. Boschetti (2009): "Southern Africa validation of the MODIS, L3JRC and Globcarbon burned-area products", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(4): 1032-1044.

Tansey, K., Grégoire, J.M., Stroppiana, D., Sousa, A., Silva, J., Pereira, J.M., Boschetti, L., Maggi, M., Brivio, P.A., Fraser, R., Flasse, S., Ershov, D., Binaghi, E., Graetz, D., y Peduzzi, P. (2004): "Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data", *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 109, D14S03, doi:10.1029/2002JD003598, 2-22

Alonso Cañas, I. y Chuvieco Salinero, E. (2016): “Desarrollo de un algoritmo global de área quemada para imágenes del sensor ENVISAT-MERIS”, *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 3-25. ISSN: 1578-5157

Tansey, K., Grégoire, J.M., Defourny, P., Leigh, R., Peckel, J.F., Bogaert, E.V., y Bartholome, J.E. (2008): “A new, global, multi-annual (2000–2007) burnt area product at 1 km resolution”, *Geophysical Research Letters*, 35, L01401, doi: 10.1029/2007GL03156

Van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G., Mu, M., Kasibhatla, P.S., Morton, D.C., DeFries, R.S., Jin, Y., y van Leeuwen, T.T. (2010): “Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009)”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11707–11735.